

## 山岳地曲線橋の地震時挙動に関する解析的検討

宇都宮大学 学生員  
正会員○ 榎原優士  
NGUYEN MINH HAI正会員  
フェロー会員藤倉修一  
中島章典

## 1. はじめに

2016年熊本地震において多くの橋梁が被害を受けたが、中でも被害の一つの特徴として、山岳地に位置する曲線橋に上部構造の残留移動等の被害が生じた。兵庫県南部地震の橋梁被害を受けて、橋梁の耐震設計も大きく変わり内陸直下型地震に対しても設計されるようになったが、兵庫県南部地震以降に設計された橋梁についても被害が見られた。曲線橋は複雑な振動特性を有していることが知られており、これまで様々な研究が行われてきた<sup>1),2)</sup>。それらの研究から、曲線橋は地震動に対する応答により、桁全体の面外方向への移動が生じやすいことが指摘されている。しかし、2016年熊本地震において、曲線橋である扇の坂橋では桁全体が回転し、桁端部の一方が面外方向、もう一方が面内方向に残留移動している被害が見られた。これは、桁の複雑な挙動や桁と橋台との衝突によるものだと考えられ、面外方向だけでなく面内方向への桁の移動についても検討する必要がある。

実際の橋梁は、桁と橋台との間に遊間が設けてあり、地震動を受けてもすぐに衝突は生じない。本検討では、その遊間を再現し、現実に近い形で地震時の挙動を検討するために、桁端部に衝突バネを設けた曲線橋モデルに対して地震波を入力し、非線形解析を行った。さらに比較のため、平面曲率のない直線橋モデルに対しても解析を行い、桁端部の衝突を考慮した曲線橋の桁の挙動と、それが下部構造に及ぼす影響について検討した。

## 2. 解析概要

解析モデルの概要図を図-1に示す。対象橋梁は、平成8年道路橋示方書に準拠して設計された山岳地に位置する橋梁であり、曲線橋における曲率外側が西側、曲率内側が東側とした。

解析モデルでは、橋台、橋脚および上部構造は線形はり要素としたが、特に大きな断面力が作用する橋脚の塑性ヒンジ部についてのみファイバー要素を用いた。ファイバー要素の材料構成則として、コンクリートの応力-ひずみ関係には星隈らの提案する包絡線<sup>3)</sup>に堺らが提案する除荷・再載荷履歴<sup>4)</sup>を組み合わせたモデル、鉄筋の応力-ひずみ関係には堺らが提案する修正 Menegotto-Pinto モデル<sup>5)</sup>を与えた。支承は各橋台および橋脚ごとに5つつけ、線形バネ要素でモデル化した。桁と橋台パラペット部、また、橋軸直角方向には変位制限ブロックを設置してあるので、それぞれの衝突を再現するため、桁端部において橋軸方向と橋軸直角方向の両方向にそれぞれ遊間250mmの衝突バネ<sup>6)</sup>を設置した。材料の設計基準強度について、コンクリート強度は24N/mm<sup>2</sup>、鉄筋の降伏強度は345N/mm<sup>2</sup>である。

本解析で用いた入力地震波は内陸直下型地震の代表的なものとして、2016年熊本地震より、防災科学技術研究所が公開しているKiK-net 益城 (KMMH16) 地表地点と気象庁による西原村小森 93048 地点および本橋らが提案する扇の坂橋の各橋台および橋脚ごとの再現地震波<sup>7)</sup>、また、兵庫県南部地震より、JMA 神戸および JR 鷹取である。これらの地震動に対して、橋梁がどのような向きで位置している

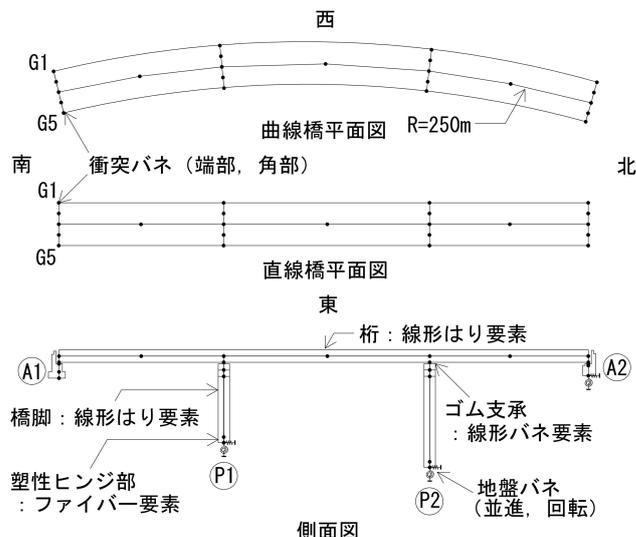


図-1 解析モデル概要図

か分からないため、それぞれの地震波で、東西南北方向をそのまま入力した場合 (ケース1)、南北方向と東西方向を入れ替えた場合 (ケース2) について解析を行った。

## 3. 解析結果および考察

## (1) A1 側桁端部における衝突

KiK-net 益城ケース1を地震動として入力し、曲線橋モデルおよび直線橋モデルに対して解析を行った。A1 橋台と桁との間の衝突バネに作用した荷重を図-2, 3にそれぞれ示す。ここで、G1は西側の端、G5は東側の端に設置してある支承位置を表している。

まず、橋軸直角方向について見ると、約21秒までの橋軸方向の衝突が起こる前に、曲線橋モデル、直線橋モデルともにほぼ同じ時刻に4回の衝突が生じている。これらの衝突は、KiK-net 益城の東西方向加速度に対する橋軸直角方向への桁の応答によるものであると考えられる。その後、橋軸方向において、曲線橋モデル、直線橋モデルいずれも3回の衝突が起こっており、G1側でより大きな衝突力が作用している。1回目と2回目の衝突では曲線橋モデルの方が若干大きい衝突力となっているが、3回目の衝突では曲線橋モデルのG1側は衝突は起こらず、直線橋モデルの衝突力の方が大きくなっている。橋軸方向における1回目の衝突以降、直線橋モデルでは、橋軸直角方向に大きな衝突が見られないのに対し、曲線橋モデルでは、西側に3回、東側に1回の衝突が発生している。これは、曲線橋では橋軸方向の衝突により、桁の回転が生じたことによって、橋軸直角方向へ桁が移動したため、橋軸方向3回目においては、G1側で衝突が起こらなかったと考えられる。

## (2) 桁の回転角

KiK-net 益城ケース1を入力地震動とした場合の桁の回転角の時刻歴応答を図-4に示す。ここで、桁の回転角 $\theta$ は桁全体の回転角を求めるために、桁の両端部の橋軸直角方向変位を基に、次式により求めた。

$$\theta = \arctan \frac{u_{A1} - u_{A2}}{L_{Deck}} \quad (1)$$

**Key Words:** 曲線橋, 内陸直下型地震, 回転挙動, ファイバー要素, 非線形動的解析, ねじりモーメント

〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科 Tel.028-689-6227

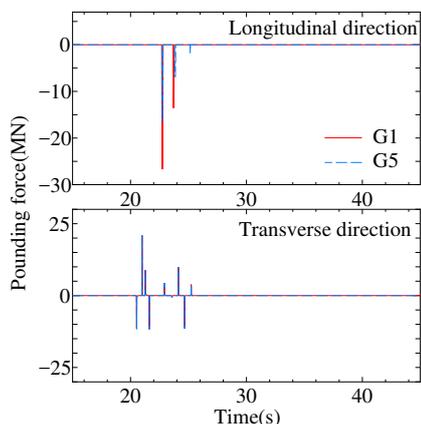


図-2 曲線橋 A1 橋台側衝突力

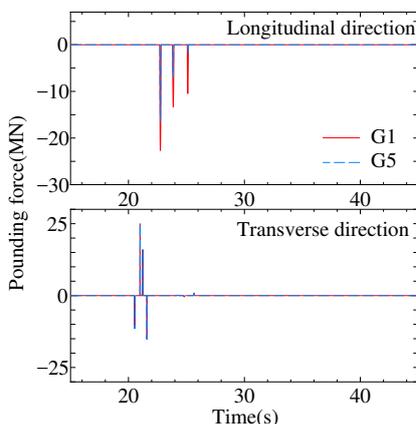


図-3 直線橋 A1 橋台側衝突力

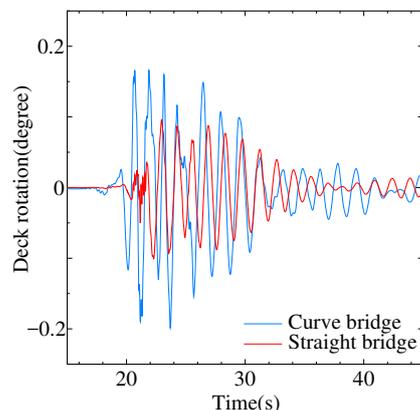


図-4 桁の回転角

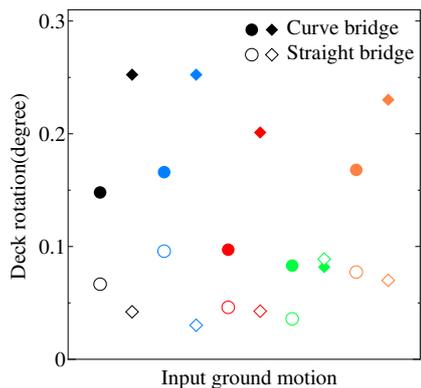


図-5 桁の最大回転角

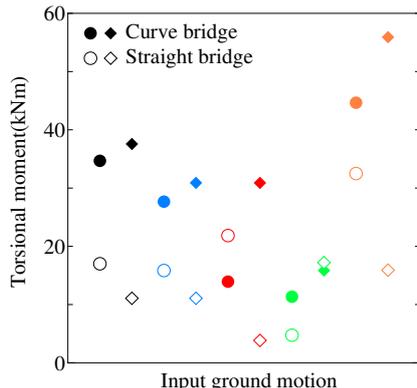


図-6 P1 橋脚最大ねじりモーメント

- Reproduced ground motion 1
- KiK-net Mashiki 1
- Nishihara village Komori 1
- JMA Kobe 1
- JR Takatori 1
- ◆ Reproduced ground motion 2
- ◆ KiK-net Mashiki 2
- ◆ Nishihara village Komori 2
- ◆ JMA Kobe 2
- ◆ JR Takatori 2

ここで、 $u_{A1}$ 、 $u_{A2}$  は A1 橋台側および A2 橋台側桁端部における桁の橋軸直角方向変位、 $L_{Deck}$  は A1 橋台側桁端部と A2 橋台側桁端部の直線距離である。図-4 より、直線橋モデルと比べて、曲線橋モデルの方が全体として大きく桁が回転していることが分かる。また、最大回転角は曲線橋は  $0.166^\circ$ 、直線橋は  $0.096^\circ$  であった。

さらに、KiK-net 益城ケース 1 に加えて、前述した内陸直下型の地震動を入力して解析を行った。図-5 は桁の回転角の最大値を比較した図である。これより、JMA 神戸ケース 2 以外の地震動で直線橋モデルよりも曲線橋モデルの最大回転角が大きくなっている。曲線橋モデルと直線橋モデルの平均最大回転角はそれぞれ  $0.168^\circ$ 、 $0.060^\circ$  となっており、曲線橋の桁が回転しやすいことを示している。ここで、JMA 神戸ケース 2 では、直線橋モデルと曲線橋モデルで同程度の最大回転角となっているが、これは、この地震動の南北方向の加速度応答スペクトルが解析モデルにおける橋軸方向応答の卓越周期付近で小さくなっており、橋軸方向の衝突が起こらなかったため桁が回転しなかったと考えられる。しかしながら、桁の回転が生じなかったため、いずれのモデルでも、回転角は他のケースに比べると小さい。

(3) 橋脚のねじりモーメント

桁の回転により、橋脚にねじりモーメントが生じると考えられるため、各地震動を入力した際の P1 橋脚のねじりモーメントを調べた。ねじりモーメントの最大値を比較したものを図-6 に示す。これより、ほとんどの地震動で直線橋モデルよりも曲線橋モデルの最大ねじりモーメントが大きな値となっている。曲線橋モデルと直線橋モデルの平均最大ねじりモーメントはそれぞれ  $30.3\text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $15.1\text{kN}\cdot\text{m}$  と、曲線橋モデルは直線橋モデルの約 2 倍の値となっている。図-5 と図-6 を比較すると曲線橋と直線橋の差は同じような傾向であり、桁の回転が橋脚のねじりモーメントに影響を及ぼしている事が分かる。

4. まとめ

本研究では、山岳地に位置する曲線橋の挙動を把握するため曲線橋モデルおよび直線橋モデルに対して、内陸直下型地震による地震動を用いて非線形動的解析を実施し、以下の結論を得た。

1. 非線形動的解析において、桁の端部に適切に衝突バネを設ける事で、桁の回転挙動を再現する事ができる。
2. 直線橋に比べて曲線橋の方が桁の回転が生じやすく、その影響で橋脚のねじりモーメントも大きくなる。しかし、桁と橋台の橋軸方向の衝突が起こらない場合や橋軸直角方向への桁の応答が極めて大きい場合は直線橋の方が桁の回転角や橋脚のねじりモーメントが大きくなる可能性もあるが、この場合、回転角やねじりモーメントはそれほど大きくはない。

参考文献

- 1) 川神雅秀, 岡林隆敏, 崎山毅: 不規則応答解析による曲線橋橋支承部の地震動最悪入力方向についての考察, 土木学会論文集, No.516/VI-27, pp.99-104, 1995.6.
- 2) 大塚久哲, 神田昌幸, 鈴木基行, 吉澤努: 水平地震動による曲線橋上部構造の移動挙動解析, 土木学会論文集, No.570/I-40, pp.305-314, 1997.7.
- 3) Hoshikuma, J., Kawashima, K., Nagaya, K. and Taylor, A.W.: Stress-strain model for confined concrete in bridge piers, Journal of Structural Engineering, Vol. 123, No. 5, pp.624-633, ASCE, 1997.
- 4) 堺淳一, 川島一彦, 庄司学: 横拘束されたコンクリートの除荷および再載荷過程における応力度~ひずみ関係の定式化, 土木学会論文集, No.654/I-52, pp.297-316, 2000.7.
- 5) 堺淳一, 川島一彦: 部分的な除荷・再載荷を含む履歴を表す修正 Menegotto-Pinto モデルの提案, 土木学会論文集, No.738/I-64, pp.159-169, 2003.7.
- 6) 渡邊学歩, 川島一彦: 衝突ばねを用いた棒の衝突の数値解析, 土木学会論文集, No.675/: 衝突ばねを用いた棒の衝突の数値解析, 土木学会論文集, No.675/I-55, pp.125-139, 2001.4.
- 7) 本橋秀樹, 野中哲也, 馬越和也, 中村真貴, 原田隆典: 熊本地震の断層近傍における地震動と橋梁被害の再現解析, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.339-352, 2017.3.